6Ж

УДК 629.1.033.3

В.В. Жога, А.Е. Гаврилов
Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия
dtm@vstu.ru

Динамический алгоритм стабилизации походки шагающей машины*

Предлагается методика построения алгоритмов стабилизации параметров походки шагающей машины с цикловыми движителями. Структура и параметры алгоритмов управления определяются на основе решения обратных задач динамики привода шагающей машины. Задача синтеза сводится к определению законов формирования задающих воздействий исполнительных двигателей. Алгоритм стабилизации представлен структурной схемой.

Шагающая машина «Восьминог», разработанная в ВолгГТУ, предназначена для движения по грунтам с низкой несущей способностью [1]. Ходовая система машины выполнена в виде двух конструктивно связанных шагающих модулей правого и левого бортов. На каждом шагающем модуле расположены две пары, работающих в противофазе, четырёхзвенных механизмов шагания. Привод каждой пары механизмов, образующих шагающий движитель, осуществляется с помощью жесткой кинематической связи от одного электродвигателя. Вследствие этого следовая дорожка машины строго фиксирована, а походка является регулярной и неуправляемой. В связи с этим во время движения машины у оператора отсутствует возможность выбора мест постановки опорных стоп, что сужает её эксплуатационные характеристики. Однако возможны такие ситуации [2], когда необходимо иметь возможность выбора точек постановки опор машины на грунт. С целью исключения этого недостатка в шагающую машину «Восьминог М2» в состав трансмиссии включается дифференциал, передающий крутящий момент от двигателя к ведущим кривошипам передних и задних движителей одного борта, а также управляемые тормоза (рис. 1). В этом случае появляется возможность управлять величинами угловых скоростей передних и задних движителей независимо друг от друга, а следовательно, изменять параметры походки машины.

В работе [3] описывается алгоритм управления параметрами походки, в зависимости от информации о координатах границ зон, запрещенных для опоры стопы на грунт, расположенных на траектории движения каждого из бортов машины. Определяется требуемая величина горизонтального смещения $\delta_0 = x_2(t) - x_1(t)$ опорных стоп передних и задних механизмов шагания на относительной траектории. Во время движения машины величину горизонтального смещения δ_0 необходимо сохранять постоянной.

Так как относительная скорость опорной стопы существенным образом зависит от её положения на траектории, то для предотвращения необратимых потерь на деформацию грунта, необходимо управлять угловыми скоростями ведущих кривошипов механизмов шагания для выравнивания этих скоростей.

---

* Работа выполнена при поддержке программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 гг.)».

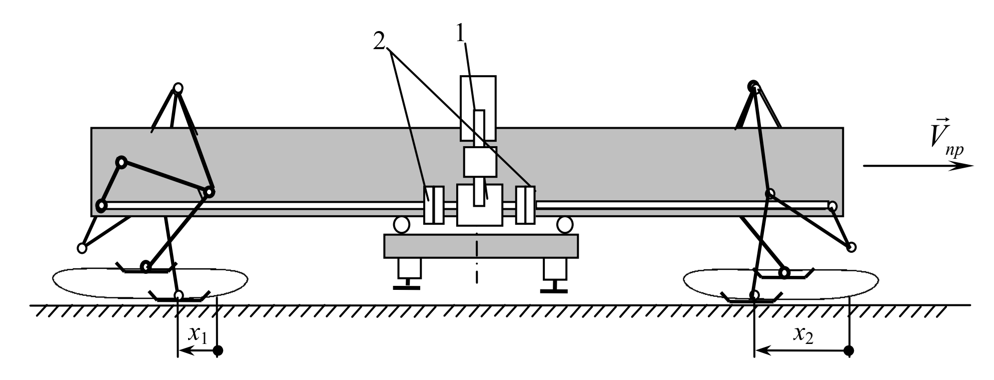


Рисунок 1 – Кинематическая схема шагающей машины «Восьминог М 2».
1 – дифференциал; 2 – управляемые тормоза

Методика построения алгоритмов стабилизации основана на решении обратных задач динамики привода шагающих движителей [4]. В качестве двигателя используется асинхронный электродвигатель, управляемый изменением частоты питающего напряжения. В этом случае задача сводится к определению законов формирования задающих воздействий для исполнительного электродвигателя.

Уравнения динамики привода механизмов шагания записывается в виде

$$J_k(\varphi_k)\ddot{\varphi}_k + \frac{1}{2}J'_k(\varphi_k)\dot{\varphi}_k^2 = F_k(\Delta_k, \dot{\Delta}_k)\frac{\partial f}{\partial \varphi_k} + \frac{M}{2} - M_k, \quad k = 1,2 \tag{1}$$

где $J_k(\varphi_k), J'_k(\varphi_k)$ – моменты инерции механизмов шагания, приведенные к валу бортового редуктора и их производные по углу поворота; $\varphi_k, \dot{\varphi}_k, \ddot{\varphi}_k$ – углы поворота кривошипов механизмов шагания, их угловые скорости и ускорения; $F_k(\Delta_k, \dot{\Delta}_k)$ – сила тяги, приложенная к опорной точке механизма шагания; $\Delta_k, \dot{\Delta}_k$ – деформация и скорость деформации грунта под опорой; M_k – управляющие тормозные моменты; M – момент электродвигателя; $f(\varphi_k)$ – зависимость перемещения опорной точки механизма шагания от угла поворота кривошипа (характеристика конкретного механизма).

Для четырёхзвенного механизма шагания, используемого в шагающей машине «Восьминог М2», функция $f(\varphi_k)$ имеет вид

$$f(\varphi_k) = x_k = -0,28\varphi_k^3 + 0,345\varphi_k^2 - 1,135\varphi_k + 1,115. \tag{2}$$

Линеаризованная динамическая характеристика асинхронного электродвигателя

$$\tau\dot{M} + M = a\left(1 - \frac{n\omega}{\nu}\right), \tag{3}$$

где τ – электромагнитная постоянная времени двигателя; a – постоянная, определяемая по каталогу асинхронных двигателей; n – число пар полюсов; ν – частота переменного тока, питающего обмотку стартера.

Согласно постановке задачи, алгоритм должен обеспечивать перемещение опорной точки одного из находящихся в фазе опоры механизмов шагания с постоянной заданной относительной скоростью V_{np}. При отклонении скорости $V_1(t)$ от заданной, уравнение, определяющее процесс установления назначенной скорости, записывается в виде

$$\dot{V}_1(t) + k_1 V_1(t) = k_1 V_{np}, \tag{4}$$

где $k_1 = const > 0$.

Так как

$$V_k\left(t\right) = \frac{\partial f}{\partial \varphi_k}\dot{\varphi}_k, \qquad (5)$$

$$\dot{V}_k\left(t\right) = \frac{\partial f}{\partial \varphi_k}\ddot{\varphi}_k + \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi_k^2}\dot{\varphi}_k^2, \qquad (6)$$

то в результате подстановки (4) – (6) в (1) находится управляющий момент

$$M_1 = F_1 f'_{\varphi_1} + \frac{M}{2} - \frac{J_1}{f'_{\varphi_1}}\left[k_1\left(V_0 - f'_{\varphi_1}\dot{\varphi}_1\right) - \dot{\varphi}_1^2\left(f''_{\varphi_1} - \frac{J'_1}{2J_1}f'_{\varphi_1}\right)\right], \qquad (7)$$

При этом предполагается, что система очувствления формирует информацию о величине силы F_1 и производит измерение угловой скорости $\dot{\varphi}_1$.

Тогда закон изменения угловой скорости описывается уравнением

$$\ddot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_1\left(\frac{f''_{\varphi_1}}{f'_{\varphi_1}}\dot{\varphi}_1 + k_1\right) = \frac{k_1 V_{np}}{f'_{\varphi_1}}, \qquad (8)$$

которое следует из (1) с учётом (6). В выражениях (7) через $f'_{\varphi_1}, f''_{\varphi_1}$ – обозначены частные производные по углу поворота от зависимости (2) перемещения опорной точки механизма шагания. Решение этого уравнения показывает, что закон изменения угловой скорости подчиняется уравнению

$$\dot{\varphi}_1 = \omega_1 = \frac{V_{np}}{f'_{\varphi_1}} - \frac{(V_{np} - V_{01})}{f'_{\varphi_1}}e^{-k_1 t}, \qquad (9)$$

где $V_{01} = \omega_{01} f'_{\varphi_1}(\varphi_{01})$ – начальное значение скорости опорной точки.

На рис. 2 показан процесс установления требуемого закона изменения угловой скорости ω_1 при различных значениях начального отклонения от программного. Из вида решения (9) следует, что по угловой скорости движение асимптотически устойчиво в целом.

Из уравнения (9) с учётом (5) находим

$$f\left(\varphi_1(t)\right) = f\left(\varphi_{01}\right) + V_{np}t - \frac{V_{np} - V_{01}}{k_1}(1 - e^{-k_1 \cdot t}), \qquad (10)$$

где $f\left(\varphi_{01}\right)$ – значение функции в начальный момент времени.

Движение по углу поворота механизма – устойчивое.

Реализованный закон изменения угловой скорости является задающим воздействием для формирования угловой скорости выходного звена другого механизма шагания. Для этого механизма требуется найти законы формирования управляющего момента M_2, при котором отклонения $\delta = x_2(t) - x_1(t)$ в переходном процессе изменяются в соответствии с решением дифференциального уравнения

$$\ddot{\delta} + k_{12}\dot{\delta} + k_{02}\delta = k_{02}\delta_0, \qquad (11)$$

где k_{12} и k_{02} – положительные постоянные.

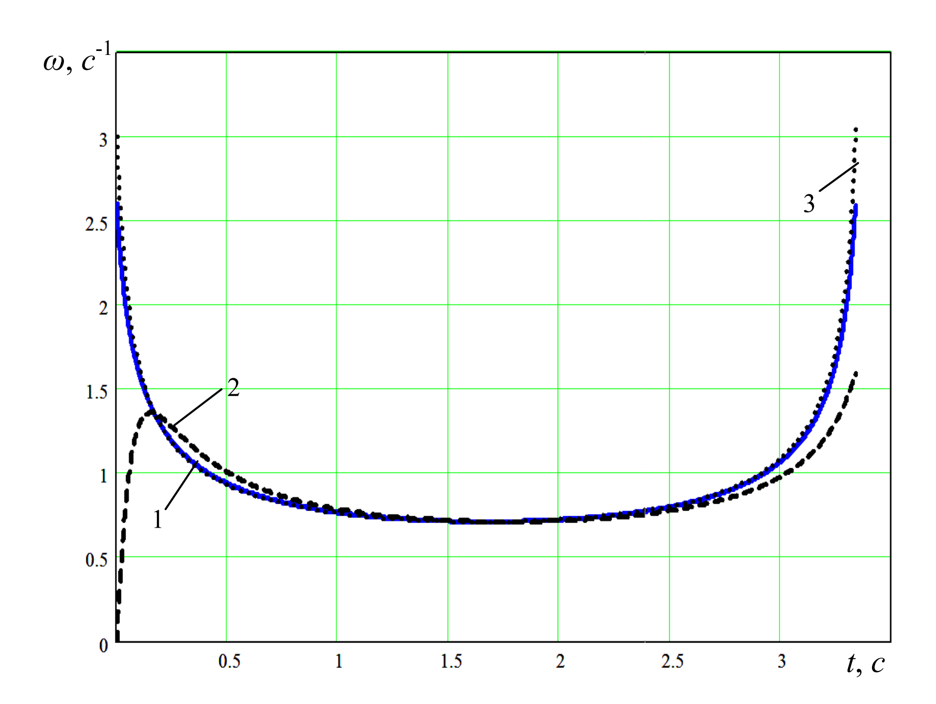


Рисунок 2 – Законы установления угловой скорости (k_1 = 10).
1 – программный закон $\omega_{пр} = 2,597\, c^{-1}$; 2 – $\omega_{01} = 0$; 3 – $\omega_0 = 3,0\, c^{-1}$

При этом скорость опорной точки этого механизма шагания V_2 стремится к заданной программной $V_{пр}$.

Определив из (11) $\ddot{\varphi}_2(t)$ подстановкой выражения для δ с использованием (5), (6) и учитывая (1), выражение для управляющего момента получается в виде

$$M_2 = F_2 f'_{\varphi_2} + \frac{M}{2} - \frac{J_2}{f'_{\varphi_2}} \Big\{ k_{02} \left[\delta_0 + f(\varphi_1) - f(\varphi_2) \right] + \\ + k_{12} \left[f'_{\varphi_1} \dot{\varphi}_1 - f'_{\varphi_2} \dot{\varphi}_2 \right] + k_1 \left(V_{01} - f'_{\varphi_1} \dot{\varphi}_1 \right) - \dot{\varphi}_2^2 \left[f''_{\varphi_2} - J'_2 f'_{\varphi_2} / 2J_2 \right] \Big\}. \tag{12}$$

Уравнение, описывающее установление заданных кинематических параметров движения входного вала этого механизма шагания, в этом случае имеет вид

$$\ddot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_2 \left[\frac{f''_{\varphi_2}}{f'_{\varphi_2}} \dot{\varphi}_2^2 + k_{12} \right] = (k_{12} + k_{02} t) \frac{V_{пр}}{f'_{\varphi_2}} - \frac{k_{02}}{k_1} \frac{V_{пр} - V_{01}}{f'_{\varphi_2}} + \\ + \frac{k_1 - k_{12} + k_{02} / k_1}{f'_{\varphi_2}} (V_{пр} - V_{01}) e^{-k_1 t} - k_{02} \frac{f(\varphi_2) - f(\varphi_{2пр})}{f'_{\varphi_2}}, \tag{13}$$

где $f\left(\varphi_{2пр}\right) = f(\varphi_{01}) + \delta_0$.

Синтезированный алгоритм содержит три параметра k_1, k_{12}, k_{02}, которые определяют характер установления требуемых законов движения, и их необходимо назначать из условия реализуемости этих движений с учетом динамики приводов управляемых тормозов. На рис. 3, 4 представлены графики переходных процессов установления требуемых законов изменения угловых скоростей $\omega_1(t)$ и $\omega_2(t)$ (рис. 3), значений заданного смещения δ_0 и скорости опорных точек $V_{пр}$. Графики получены для следующих условий

программного движения: $V_{пр} = 0{,}2$ м/с, $\delta_0 = 0{,}18$ м, $\varphi_{01} = 2{,}545$ ($x_1(0) = 0$); $\varphi_{02} = 3{,}5$. В начальный момент времени скорости опорных точек равны нулю, а значение начального смещения опорных точек механизмов шагания отличается от требуемого на 30 %.

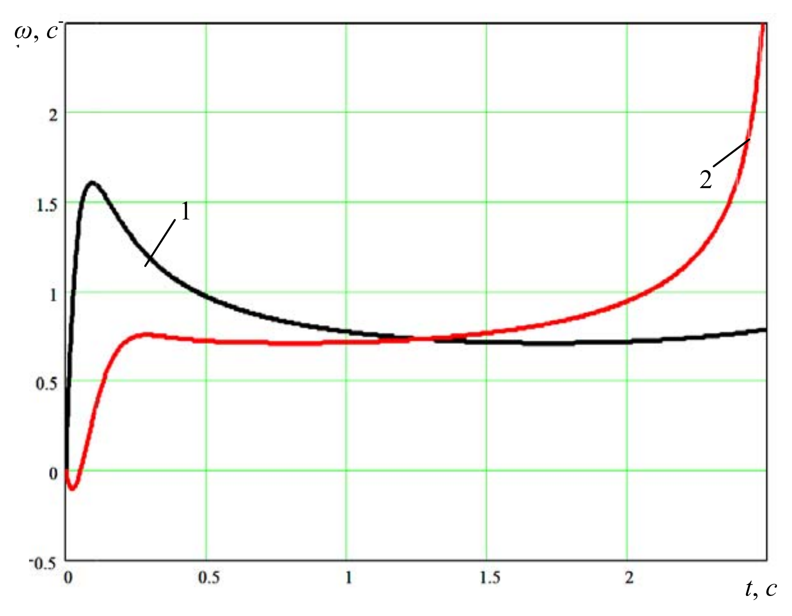


Рисунок 3 – Процесс установления программных законов изменения угловых скоростей $\omega_1(t)$ и $\omega_2(t)$

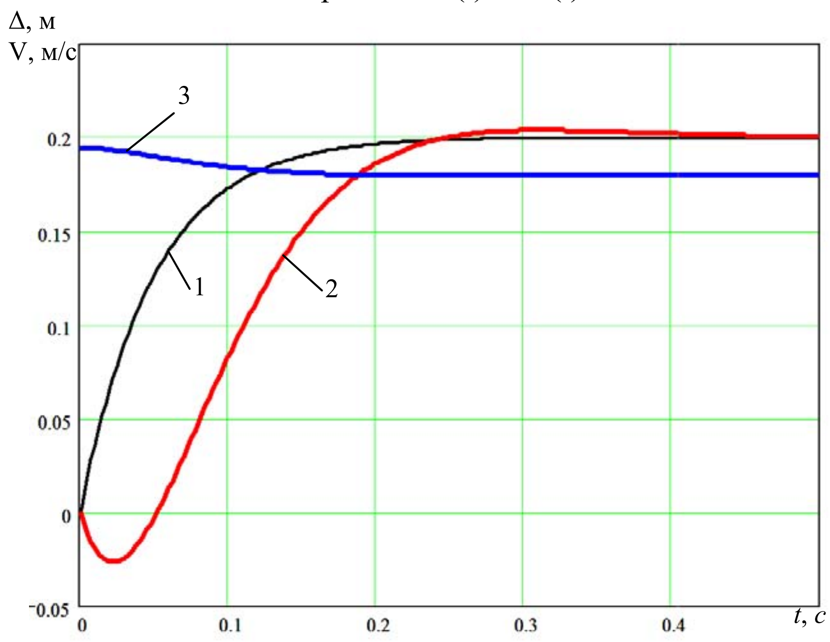


Рисунок 4 – Характер переходных процессов при установлении программной скорости движения: 1, 2 – скорости опорных точек механизмов шагания; 3 – требуемой величины горизонтального смещения опорных стоп

Как видно, установление постоянной скорости движения и заданной величины смещения достигается за время, равное примерно 0,3 с. В действительности, в силу инерционности исполнительных приводов фактическое движение будет отличаться от задаваемого.

Для определения частоты управляющего напряжения по значениям ω_1 и ω_2, находится угловая скорость входного вала дифференциала $\omega = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$, которая подставляется в (2) и из полученного равенства, при заданном моменте электродвигателя, определяется управляющая частота.

Литература

1. Брискин Е.С., Жога В.В., Чернышев В.В., Малолетов А.В. Основы расчета и проектирования шагающих машин с цикловыми движителями: монография. – М: Машиностроение, 2006. – 164 с.
2. Брискин Е.С., Жога В.В., Покровский Д.Н., Шурыгин В.А. Мобильный робототехнический комплекс для гуманитарного разминирования // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2007. – № 3. – С. 28-37.
3. Об управлении походкой шагающей машины «Восьминог» / Брискин Е.С. // Механика. Автоматизация. Управление. – 2008. – № 5. – С. 6-10.
4. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели. – Наука. Гл. ред. физ.-мат., 1988. – 328 с.

В.В. Жога, А.Є. Гаврилов

Динамічний алгоритм стабілізації ходи крокуючої машини

Пропонується методика побудови алгоритмів стабілізації параметрів ходи крокуючої машини з цикловими рушіями. Структура і параметри алгоритмів керування визначаються на основі розв'язання зворотних задач динаміки приводу крокуючої машини. Задача синтезу зводиться до визначення законів формування задавальних впливів виконавчих двигунів. Алгоритм стабілізації представлено структурною схемою.

V.V. Zhoga, A.E. Gavrilov

Dynamical Algorithm of Moving Data Walking Machine

A new method of making an algorithm to stabilize the moving data of the machine with cyclic propelling agents is presented. The control structure and data of the algorithms are defined on the basis of doing the inverse dynamic sums of the moving machine drive. The synthesis aim reduces to the laws definition of the executive engines setting influences. This stabilization algorithm is presented in the structural schemes.

Статья поступила в редакцию 10.07.2008.